

部分相干涡旋光束的实验研究

华黎闽 陈子阳 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 将氦氖激光器输出的激光经过望远镜系统进行扩束,并在望远镜系统的共焦点附近加入一块转动的毛玻璃,通过改变毛玻璃位置获得不同相干度的部分相干光束,再入射到螺旋相位板最终获得部分相干涡旋光束,通过更换不同的螺旋相位板获得不同拓扑荷数的涡旋光束。研究表明涡旋光束的光强分布将随着光束相干特性的变化而变化。随着入射光束相干度的降低,涡旋光束的中心光强将不再为零,而是慢慢增加,光斑的图像对比度逐渐降低。涡旋光束的空心大小与光束的拓扑荷数有密切关系。根据实验条件模拟的理论结果和实验结果基本一致。

关键词 相干光学;涡旋光束;部分相干;拓扑荷数

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.s100403

Experimental Investigations on Partially Coherent Vortex Beams

Hua Limin Chen Ziyang Pu Jixiong

(Department of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract A He-Ne beam is extended by a telescope system and a rotating ground glass is located near the focus of the telescope system. Different coherence degree of partially coherent beam can be obtained by changing the position of the rotating ground-glass plate. A partially coherent vortex beam can be obtained as the partially coherent beam passes through a spiral phase plate and the topological charge varies with the changing of different spiral phase plates. The research shows that the intensity distribution of vortex beam will change with the varying of the coherent characteristics. Moreover, with the decrease of the coherence degree of the incident beam, the intensity of the vortex beam center will not be zero, but increase. The image contrast of the light spot will decrease at the same time. The size of the hollow core of vortex beam has close relationship with the topological charge. The numerical simulations according to the experiment condition agree with the experiment results.

Key words coherence optics; vortex beam; partially coherent; topological charge

OCIS codes 030.1640; 050.4865; 110.4980

1 引 言

具有螺线型相位分布的光束称为涡旋光束,该光束的相位因子可描述为 $\exp(il\theta)$,其中 l 称为涡旋光束的拓扑荷数, θ 为平面角,光束中的每个光子携带有 lh 轨道角动量^[1,2]。涡旋光束具有很多重要的应用,如 Ginson 等^[3]研究发现可以利用涡旋光束的轨道角动量对信息进行编码,这种新型编码方式具有更高的保密性。此外,涡旋光束还可以应用于微粒子的囚禁与操控等^[4,5],因此研究人员对涡旋

光束进行了大量的研究^[6~8]。其中关于部分相干涡旋光束是一个很有意义的研究方向,部分相干涡旋光束具有很多不同于完全相干涡旋光束的特性。Palacios 等^[9~14]分别对部分相干涡旋光束的相干涡旋性质进行了研究。刘义东等^[15]研究了部分相干涡旋光束的轨道角动量并发现,随着相干度的变化,轨道角动量也会发生相应的变化,其轨道角动量谱会展宽。然而目前关于部分相干涡旋光束的研究大部分都局限于理论方面,而较少涉及到实验方

收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2010-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(60977068)和福建省自然科学基金(A0810012)资助课题。

作者简介: 华黎闽(1981—),男,硕士研究生,主要从事光束传输方面的研究。E-mail: hualimin@hqu.edu.cn

导师简介: 蒲继雄(1962—),男,博士,教授,主要从事光束传输方面的研究。E-mail: jixiong@hqu.edu.cn(通信联系人)

面^[16]。因此本文对部分相干涡旋光束进行了研究,主要研究了光束的相干特性对其光强分布的影响。

2 理论基础

实验原理图如图 1 所示,图中 L1,L2 表示透镜, f_1,f_2 表示焦距。由氦氖激光器输出的光经过

望远镜系统进行扩束,在望远镜系统前后透镜的共焦点附近加入一块转动的毛玻璃,从而获得部分相干光束。该部分相干光束入射到螺旋相位板上,最终获得部分相干涡旋光束,并由光束分析仪进行记录。通过改变毛玻璃的位置,可以改变入射光束的相干度。

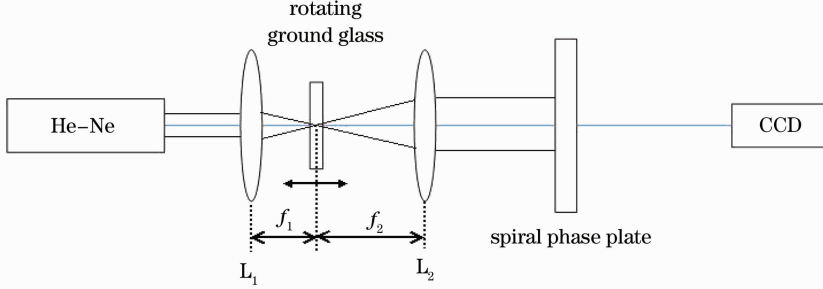


图 1 部分相干涡旋光束的实验装置图

Fig. 1 Experiment setup

根据图 1,进行了相应的理论计算。由氦氖激光器输出的光束可以近似看成是光强呈高斯分布的完全相干平面波。通过加转动毛玻璃的扩束系统之后,得到了部分相干光束,入射到螺旋相位板获得部分相干涡旋光束,其交叉谱密度可以表示为

$$W(\rho_1, \rho_2, \theta_1, \theta_2, z = 0) = \left(\frac{\rho_1}{w}\right)^l \left(\frac{\rho_2}{w}\right)^l \exp\left(-\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2}{w^2}\right) \exp\left\{-\frac{[\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2\cos(\theta_1 - \theta_2)]}{\delta^2}\right\} \times \exp[-il(\theta_1 - \theta_2)], \quad (1)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \theta_1, \theta_2$ 为入射平面的位置坐标, w 为光斑大小, l 为光束的拓扑荷数, δ 为相干长度 $\exp\left\{-\frac{[\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2\cos(\theta_1 - \theta_2)]}{\delta^2}\right\}$ 为相干度。

基于交叉谱密度公式,在自由空间中传输一段距离 z 后的交叉谱密度可以表示为^[17]

$$W(r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \int \int \int \int W(\rho_1, \rho_2, \theta_1, \theta_2, z = 0) \times \exp\left\{-\frac{ik}{2z} \{[\rho_1^2 + r_1^2 - 2\rho_1 r_1 \cos(\theta_1 - \varphi_1)] - [\rho_2^2 + r_2^2 - 2\rho_2 r_2 \cos(\theta_2 - \varphi_2)]\}\right\} d\rho_1 d\rho_2 d\theta_1 d\theta_2, \quad (2)$$

式中 $r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2$ 为接收平面的位置坐标, k 为波矢。

经过积分运算后,可以将(2)式改写为

$$W(r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2, z) = \left(\frac{k}{z}\right)^2 \exp\left[-\frac{ik}{2z}(r_1^2 - r_2^2)\right] \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int \int \left(\frac{\rho_1}{w}\right)^l \left(\frac{\rho_2}{w}\right)^l \exp\left[-\left(\frac{1}{w^2} + \frac{1}{\delta^2}\right)(\rho_1^2 + \rho_2^2)\right] \times \exp\left[-\frac{ik}{2z}(\rho_1^2 - \rho_2^2)\right] J_m\left(\frac{k\rho_1 r_1}{z}\right) J_m\left(\frac{k\rho_2 r_2}{z}\right) I_{l+m}\left(\frac{2\rho_1\rho_2}{\delta^2}\right) \exp[-im(\varphi_1 - \varphi_2)] \rho_1 \rho_2 d\rho_1 d\rho_2. \quad (3)$$

式中 J_m 为 m 阶第一类贝塞尔函数, I_{l+m} 为 $l+m$ 阶变形第一类贝塞尔函数。

令 $r_1 = r_2, \varphi_1 = \varphi_2$,则 z 位置处的光强表示为

$$I(r, \varphi, z) = W(r, r, \varphi, \varphi, z). \quad (4)$$

根据(4)式可以对部分相干涡旋光束的光强分布进行数值模拟。

3 数值结果

为了研究相干特性对部分相干涡旋光束的影响,在扩束系统中加入了转动的毛玻璃,通过改变毛玻璃的位置,实现对光束相干特性的调节,并利用双缝干涉条纹,计算出在螺旋相位板处(即入射涡旋光束)的相干度^[17]。不加毛玻璃的时候,光束的相干度较高。加入毛玻璃之后,相干度会减小。毛玻璃

离扩束系统的共焦点越远,相干性越差。

图 2 研究了相干度对 $l=1$ 的部分相干涡旋光束光强的影响,部分参数为 $\omega=1$ mm, $\lambda=632.8$ nm, $z=1$ m。从图 2(a),(e)中可以看出,当相干度较高(相干长度较长)时,涡旋光束的中心光强基本为零,光斑图像的对比度较高,光强空心分布很明显。而在其它图中,相干度较低(相干长度较短),部分相干涡旋光

束的中心光强不再为零,光斑图像的对比度也相应降低。并且随着相干度的进一步降低,中心光强将逐渐增强,光斑图像的对比度也继续降低,光强空心分布则变得越来不明显。根据实验参数模拟的数值结果与实验结果比较,相干度对光强分布影响的现象基本一致。但由于衍射效应的存在,实验结果中,在涡旋光束的外围出现了一系列的衍射亮环。

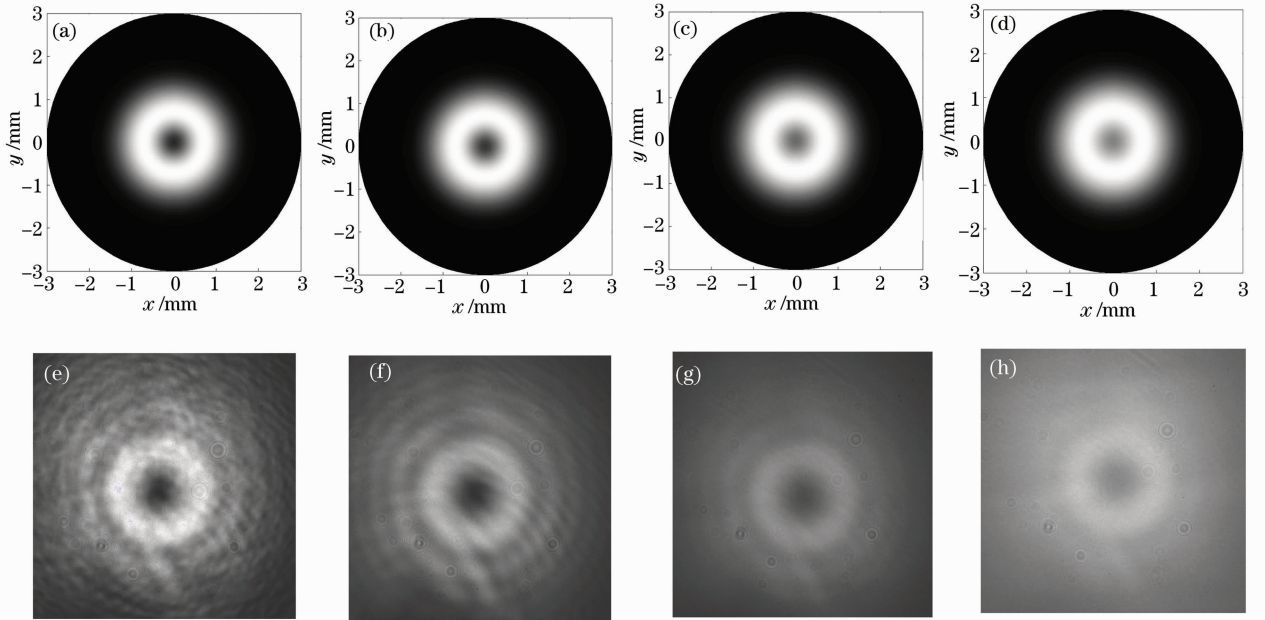


图 2 $l=1$ 部分相干涡旋光束的光强分布。(a),(b),(c),(d):理论模拟;(e),(f),(g),(h):实验结果;(a),(e):相干长度 $\delta=1.08$ mm;(b),(f):相干长度 $\delta=0.926$ mm;(c),(g):相干长度 $\delta=0.646$ mm;(d),(h):相干长度 $\delta=0.568$ mm

Fig. 2 Intensity distribution of partially coherent vortex beam ($l=1$). (a),(b),(c),(d): numerical simulations; (e),(f),(g),(h): experimental results; (a),(e): coherent length $\delta=1.08$ mm; (b),(f): coherent length $\delta=0.926$ mm; (c),(g): coherent length $\delta=0.646$ mm; (d),(h): coherent length $\delta=0.568$ mm

图 3 和 4 分别对应 $l=2$ 和 3 的部分相干涡旋光束,部分参数同图 2。所获得结果和 $l=1$ 的涡旋光束基本一致,即随着光束相干度的降低,涡旋光束的中心光强增加,而光斑图像的对比度则降低,光强空心分布会变得越来越不明显。根据实验参数模拟的数值结果与实验结果现象基本一致。此外,通过对图 2,图 3 和图 4 比较还可以看出,随着拓扑荷数的增加,其空心也相应的增大。

4 结 论

本文从实验上研究部分相干涡旋光束,主要研

究了其光强分布随相干特性的变化情况。利用转动的毛玻璃获得部分相干光束,通过调整毛玻璃的位置可以改变光束的相干度,其大小可以通过测量光束的双缝干涉条纹可见度获得。该部分相干光束入射到螺旋相位板上可以获得部分相干涡旋光束,利用光束分析仪测量其光强分布。实验结果表明,随着相干度的变化,其光强分布会出现相应的变化,涡旋光束的中心光强会随着相干度的降低而增强。理论模拟的数值结果和实验结果基本一致。通过该实验装置可以获得相干度和拓扑荷数可变的相干涡旋光束。

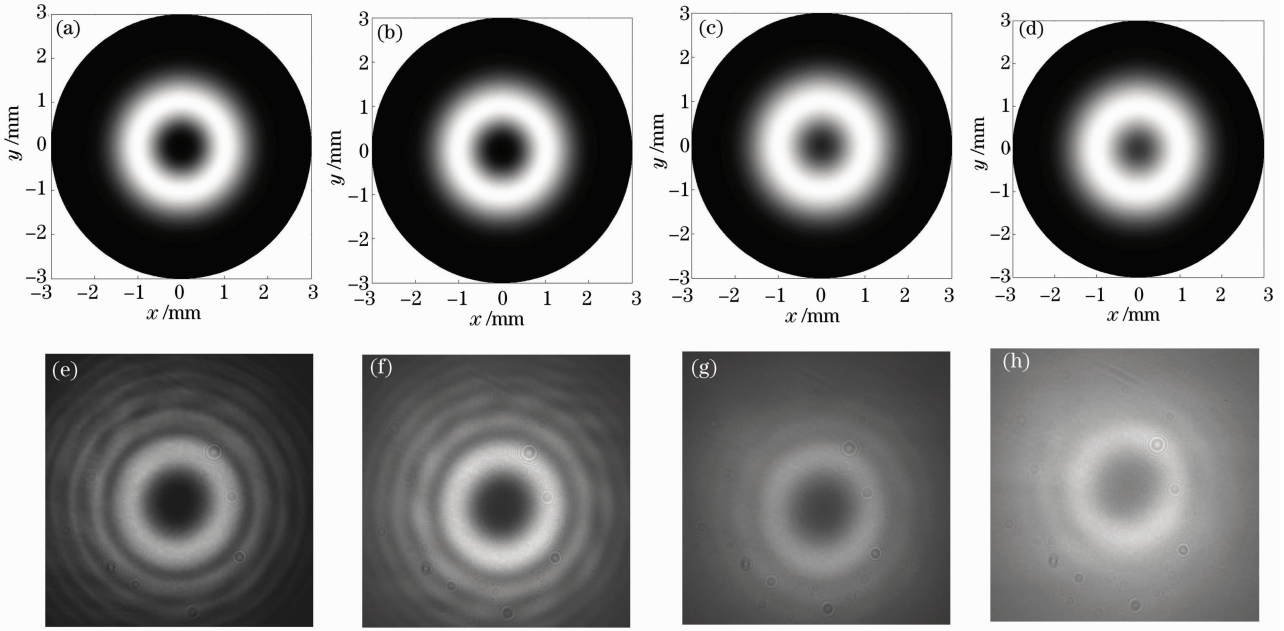


图 3 $l=2$ 部分相干涡旋光束的光强分布。(a), (b), (c), (d): 理论模拟; (e), (f), (g), (h): 实验结果; (a), (e): 相干长度 $\delta=1.3$ mm; (b), (f): 相干长度 $\delta=1.13$ mm; (c), (g): 相干长度 $\delta=0.554$ mm; (d), (h): 相干长度 $\delta=0.482$ mm

Fig. 3 Intensity distribution of partially coherent vortex beam ($l=2$). (a), (b), (c), (d): numerical simulations; (e), (f), (g), (h): experimental results; (a), (e): coherent length $\delta=1.3$ mm; (b), (f): coherent length $\delta=1.13$ mm; (c), (g): coherent length $\delta=0.554$ mm; (d), (h): coherent length $\delta=0.482$ mm

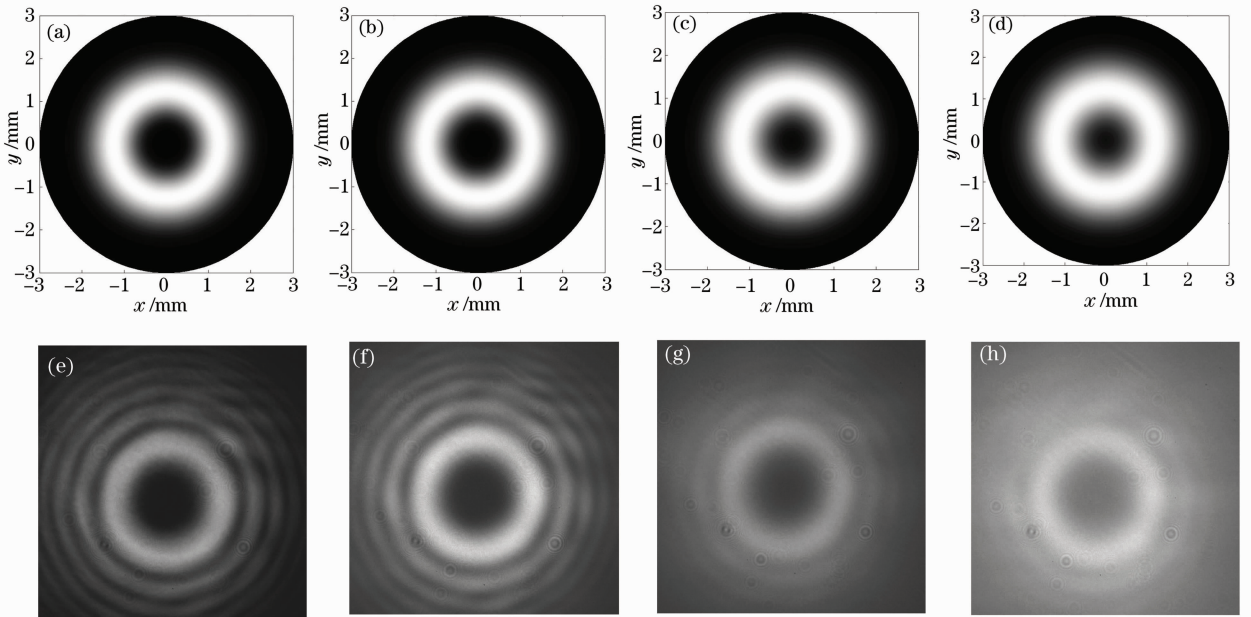


图 4 $l=3$ 部分相干涡旋光束的光强分布。(a), (b), (c), (d): 理论模拟; (e), (f), (g), (h): 实验结果; (a), (e): 相干长度 $\delta=1.3$ mm; (b), (f): 相干长度 $\delta=1.13$ mm; (c), (g): 相干长度 $\delta=0.554$ mm; (d), (h): 相干长度 $\delta=0.482$ mm

Fig. 4 Intensity distribution of partially coherent vortex beam ($l=3$). (a), (b), (c), (d): numerical simulations; (e), (f), (g), (h): experimental results; (a), (e): coherent length $\delta=1.3$ mm; (b), (f): coherent length $\delta=1.13$ mm; (c), (g): coherent length $\delta=0.554$ mm; (d), (h): coherent length $\delta=0.482$ mm

参 考 文 献

- 1 P. Couillet, L. Gill, F. Rocca. Optical vortices [J]. *Opt. Commun.*, 1989, **73**(5): 403~408
- 2 L. Allen. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(11): 8185~8189
- 3 G. Ginson, J. Courtial, M. J. Padgett. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(22): 5448~5456
- 4 H. He, M. E. Friese, N. R. Heckenberg. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(5): 826~829
- 5 J. E. Curtis, B. A. Koss, D. G. Grier. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**: 169~175
- 6 Lu Xuanhui, Huang Huiqin, Zhao Chengliang *et al.*. Optical vortex beams and optical vortices[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 50~56
陆璇辉, 黄慧琴, 赵承良 等. 涡旋光束和光学涡旋[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 50~56
- 7 Chen Ziyang, Zhang Guowen, Rao Lianzhou *et al.*. Determining the orbital angular momentum of vortex beam by Young's double-slit interference experiment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1063~1067
陈子阳, 张国文, 饶连周 等. 杨氏双缝干涉实验测量涡旋光束的轨道角动量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1063~1067
- 8 He De, Yan Hongwei, Lü Baida. Evolution and composite optical vortices of Hermite-Gaussian vortex beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2023~2029
何 德, 闫红卫, 吕百达. 厄米高斯涡旋光束形成的合成光涡旋及演化[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2023~2029
- 9 D. M. Palacios, I. D. Maleev, A. S. Marathay *et al.*. Spatial correlation singularity of a vortex field[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(14): 143905
- 10 G. A. Swartzlander, J. Jr. Schmit. Temporal correlation vortices and topological dispersion[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(9): 093901
- 11 I. D. Maleev, G. A. Jr. Swartzlander. Propagation of spatial correlation vortices[J]. *J. Opt. Sci. Am. B*, 2008, **25**(6): 915~922
- 12 I. D. Maleev, D. M. Palacios, A. S. Marathay *et al.*. Spatial correlation vortices in partially coherent light: theory[J]. *JOSA B*, 2004, **21**(11): 1895~1900
- 13 Cheng Ke, Zhang Hongrun, Lü BaiDa. Coherence vortex properties of partially coherent vortex beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(1): 246~255
程 科, 张洪润, 吕百达. 部分相干涡旋光束形成的相干涡旋特性研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(1): 246~255
- 14 Cheng Ke, Lü Baida. Spatial correlation properties and correlation vortices of partially coherent vortex beams diffracted by an aperture [J]. *Mod. Opt.*, 2009, **56**(9): 1119~1127
- 15 Y. D. Liu, C. Q. Gao, M. W. Gao *et al.*. Coherent-mode representation and orbital angular momentum spectrum of partially coherent beam [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(8): 1968~1975
- 16 H. Di Lorenzo Pires, J. Woudenberg, M. P. Van Exter. F. Measurement of the orbital angular momentum spectrum of partially coherent beams [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(6): 889~891
- 17 L. Mandel, E. Wolf. *Optical Coherence and Quantum Optics* [M]. Cambridge University Press, 1995. 276~277